干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于遥感的银川市建成区城市扩展及其热环境变化分析

张晓东[1,2],赵银鑫[1],武 丹[3],褚小东[1],吴文忠[1],张 勇[1],刘乃静[1],李 艳[4]
(1 宁夏回族自治区地质调查院,宁夏 银川 750021; 2 中国地质大学(北京)信息工程学院,北京 100083;
3 宁夏回族自治区遥感测绘勘查院,宁夏 银川 750021;
4 宁夏回族自治区银川市规划建筑设计研究院有限公司,宁夏 银川 750021)

摘 要:为研究银川市城市建成区扩展对热环境的影响,基于1989、1999、2010年和2017年Landsat系列遥感数据,采用建筑用地指数(*IBI*)提取4个年份的城市建成区信息,获取了城市形态演化指标,利用热红外波段反演不同年份的地表温度;在此基础上,分析了城市扩展和热环境变化的时空演变特征,探讨了城市扩展和热环境之间的响应关系。结果表明:(1)1989—2017年银川市城市建成区扩展面积达506.13 km²,各时期的扩展速度和扩展强度差异明显,城市扩展具有"缓慢—快速—稳步"的阶段性特征,城市空间形态趋于紧凑化,向着稳定状态发展,城市整体向东部和北部扩展,重心整体向东北方向迁移约5.54 km。(2)热岛范围随着城市扩展不断扩大,较高温区域所占热岛比例呈先减小后增加的趋势,高温和特高温占比表现出先增加后减小的特征,热岛强度逐渐向较高温区转移,城市热岛效应得到缓解;热岛空间分布显示,热岛逐渐由兴庆区老城区蔓延至贺兰县和西夏区,且兴庆区热岛逐渐演化为相互独立的小次级热岛,强度有所降低;28 a间银川市城市热岛比例指数(*URI*)表现出先上升后下降的特征,整体呈上升趋势。(3)热岛区域在空间分布和扩展方向上与城市扩展具有较高的一致性,城镇用地、公交建设用地和裸地能促进地表温度升高,而草地和水体能够降低地表温度,公园绿地和水体能有效缓解银川市城市热岛效应且后者对降低城市地表温度的效果要好于前者。

关 键 词: 城市扩展;热环境变化;地表温度;遥感;银川市
文章编号:

2014年已有54%的世界人口居住在城镇地区,预计2050年世界城镇人口比例有望突破66%,持续的人口增长和城镇化预计将为世界新增25×10⁸城镇人口,其中接近90%的增长集中于亚洲和非洲[1]。改革开放以来,我国城镇化加速推进,大约有40%的人口居住在城市,推动经济快速发展的同时也导致了诸多生态环境问题,城市空间热环境变化就是其中最为严重的问题之一[2]。城市空间热环境是指能够影响人体对冷暖的感受程度、健康水平和人类生存发展等与热有关的物理环境,其演变过程与人类社会和经济活动关系密切,是衡量城市生态环境状况的重要指标之一,研究城市热环境变化以及影响因素对于缓解城市生态环境问题意义重大[3-4]。因此,如何定量研究城市扩展、城市热环境的动态变化及二者之间的关系已成为当前城市空间热环境研究的重要内容。目前,基于遥感数据获取城市范围及其由城市扩张引起的地表热环境演变状况已成为研究城市扩张过程与城市热岛效应强度等城市问题的重要手段[5]。近年来,利用Landsat系列数据研究不同时期城市扩展和热环境的时空变化及其相互关系已成为国内外学者的研究热点,且研究范围逐渐由经济发达地区的特大城市、大城市向具有产业特色的中小城市拓展[6-9],但对我国西北地区城市研究较少。

收稿日期: 2019-09-02; **修订日期:** 2019-12-05
资助项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2020AAC03444);宁夏回族自治区财政厅财政专项"银川都市圈城市地质调查项目"(宁财(预)发[2017]320号)
作者简介: 张晓东(1980-),男,博士,高级工程师,主要从事环境遥感应用研究工作. Email:33131692@qq.com

银川市是宁夏回族自治区首府，是国家“十三五”重点建设区域“沿黄城市带”的核心城市，改革开放后发展十分迅速，城镇化水平不断提高，2018年银川常驻人口城镇化率达到77.1%。由于城区规模不断扩大，不透水面面积增多，城市热岛效应日益突出，因此，研究银川市城市扩展和热环境变化之间的响应关系具有重要意义。近年来，多位学者对银川市不同区域的热环境变化进行了大量研究，吕荣芳等[10]从热力景观学的角度定量分析了不同阶段银川市热环境景观格局演变特征、不同土地利用类型的热环境效应以及土地利用与热力景观格局的相互关系；孙鹏等[11]基于Landsat系列遥感影像数据，研究了银川市热岛效应的时空变化特征。上述研究由于数据获取时间、研究区域和研究侧重点不同，未能进一步分析城市建成区扩展及其与热环境变化的响应关系。鉴于此，本文基于4期Landsat系列遥感数据，提取银川市城区不同时期的城市用地信息，反演地表温度，分析其城市扩展与热环境的时空变化特征并探讨二者的响应关系，揭示地表温度与不同土地利用类型之间的关系，以期为银川宜居城市和生态城市建设提供科学参考依据。

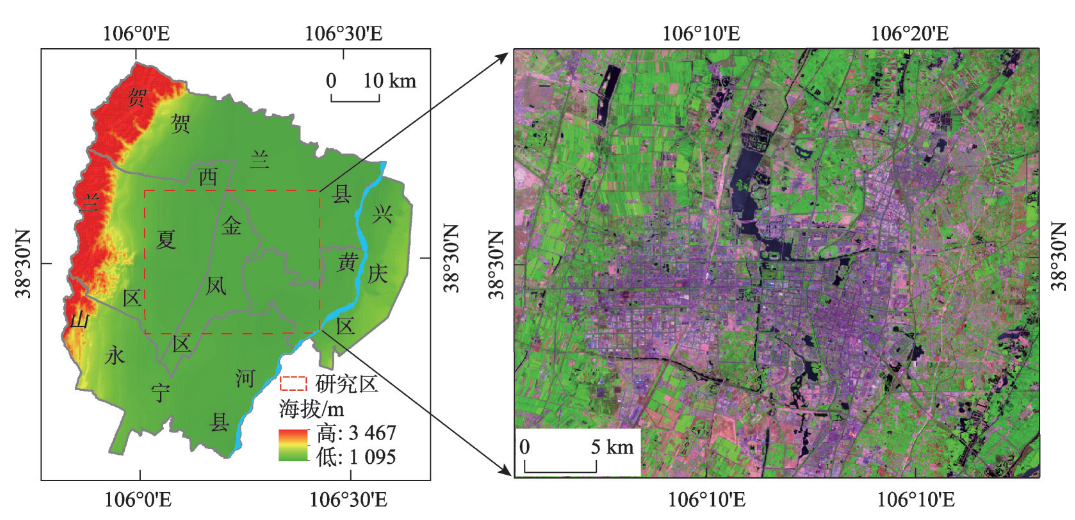
1 研究区域及数据源处理

1.1 研究区域

银川位于宁夏平原中部，东踞鄂尔多斯西缘、西依贺兰山，黄河从市境穿过，不仅是中蒙俄、新亚欧大陆桥经济走廊核心城市，也是国家“十三五”重点建设区域“沿黄城市带”的核心城市。本研究根据《银川市城市总体规划(2011—2020年)》，选取银川市三区和贺兰县城市建成区研究区，总面积约为1 088.93 km^2(图1)。气候属温带大陆性气候，多晴朗干燥天气，降水稀少，年平均气温为8.5 ℃，多年平均降水量约250 mm。地形整体西高东低、南高北低，平均海拔1 100~1 200 m，地貌属冲积平原。地表水水源充足，水质良好，沟渠成网，湖泊湿地众多；土壤有灰褐土、灰钙土、草甸土等9个类型，非常适合发展农业和多种经济作物的生长；植被以草原和荒漠植被为主，森林较少，树种多为杨树、柳树、榆树等耐旱型植物，2020年全市森林覆盖率将达到16.5%。随着银川市经济快速发展，城市显著扩张，使城市热环境及其空间分布格局发生了很大变化。自2000年以来，银川市区、贺兰县和永宁县35 ℃以上的天数呈上升趋势，夏季发布高温黄色、橙色、红色警报的日数较以往都有所增加。

1.2 数据源及预处理

本文使用的遥感数据主要为Landsat系列遥感数据，其中Landsat 5 TM影像获取日期分别为1989年8月24日、1999年8月12日和2010年7月1日，Landsat 8 OLI和TIRS影像获取日期为2017年9月6日，影像质量完好，无云和条带。以上数据在ENVI5.0中完成了几何校正、重采样、图像裁剪等预处理，几何校正均方根误差(*RMSE*)控制在0.5像元内，对4期Landsat遥感影像基于FLAASH大气校正模型进行了大气校正。此外，选取2017年6月16日



注：左图虚线长方形标示为研究区范围，覆盖银川市西夏区、金凤区、兴庆区以及贺兰县建成区

图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of study area

的GF2遥感影像和地理空间数据云提供的MODIS地表温度8 d合成产品作为验证数据评价城市建成区提取范围和地表温度反演精度，由于1989年和1999年没有与TM数据相同日期的MODIS数据，因此本研究只使用了2010年和2017年与Landsat数据相同日期的MODIS地表温度产品。

2 研究方法

2.1 城市建成区信息提取

城市建成区是指城市市区连片集中及分散在近郊与城市有密切联系、具有基本完善市政公用设施的城市建设用地。近年来，诸如差值建筑指数[12]（*DBI*）、归一化差值建筑指数[13]（*NDBI*）和建筑用地指数[14]（*IBI*）等基于遥感数据的提取方法具有自动化程度高、提取精度高的特点，已逐步成为当前常用的建筑用地信息提取方法。研究表明，*IBI*指数耦合了归一化差值建筑指数（*NDBI*）、土壤调节植被指数（*SAVI*）和改进的归一化差值水体指数[15]（*MNDWI*）3种指数，能有效地提取建筑用地信息，最高提取精度可达98%[8]。因此，本文选用*IBI*遥感指数提取研究区的建筑用地信息，获得不同年份的城市建成区范围，其计算公式为：

$$IBI=\frac{NDBI-(SAVI+MNDWI)/2}{NDBI+(SAVI+MNDWI)/2} \qquad (1)$$

式中：*NDBI*为归一化差值建筑指数；*SAVI*为土壤调节植被指数；*MNDWI*为改进的归一化差值水体指数。

2.2 城市空间形态演化指标

城市扩展使城市空间形态不断演化，研究城市空间形态演变特征对深入认识城市化过程和机理具有十分重要的意义。城市空间形态演化常用指标有扩展强度指数、扩展速度指数、分维数以及紧凑度指数[17-19]，本文采用上述指标定量描述研究区的城市空间形态，对银川市的城市用地时空扩展变化和外部形态演变特征进行系统分析，各指标计算公式见公式（2）~（8）。

（1）扩展强度指数*AGR*，用于研究不同时期城市扩展强弱及其扩展规模特征，其计算公式为：

$$AGR=(U_{A(n+i)}-U_{Ai})/nU_{Ai}\times 100\% \qquad (2)$$

式中：$U_{A(n+i)}$和U_{Ai}分别为为第$n+i$年和i年的城市面积；n为时间，单位为年。

（2）扩展速度指数*AGA*，用于比较不同时期城市扩展快慢，其计算公式为：

$$AGR=(U_{A(n+i)}-U_{Ai})/nU_{Ai}\times 100\% \qquad (3)$$

式中：$U_{A(n+i)}$和U_{Ai}分别为为第$n+i$年和i年的城市面积；n为时间，单位为年。

（3）紧凑度指数*BCI*，该指数描述城市平面轮廓形态的紧凑程度，*BCI*值在0～1之间，其值越大，城市形状越具紧凑型；反之，其形状的紧凑性越差，其计算公式为：

$$BCI=\sqrt{2\pi A}/P \qquad (4)$$

式中：A为建成区面积；P为城市建成区域轮廓的周长。

（4）分维数D，该指数描述了城市空间外部形态的复杂程度，在城市空间形态的研究中，常采用周长面积法计算其空间形态的分形特征：

$$D=2\lg(P/4)/\lg A \qquad (5)$$

式中：P为斑块周长；A为斑块面积；D值范围在1～2之间，其值越大，表明斑块越复杂。

（5）重心迁移

重心迁移模型能从空间上描述城市重心在时空上的变化过程，通过计算不同时期城市的分布重心，能够发现区域城市的空间变化趋势，第t年建成区斑块重心坐标及迁移距离计算方法分别为：

$$X_t=\sum_{i=1}^{n}(C_{ti}\times X_i)\Big/\sum_{i=1}^{n}C_{ti} \qquad (6)$$

$$Y_t=\sum_{i=1}^{n}(C_{ti}\times Y_i)\Big/\sum_{i=1}^{n}C_{ti} \qquad (7)$$

表1 *NDBI*、*SAVI*和*MNDWI*计算公式

Tab. 1 Calculation formulas of *NDBI*, *SAVI* and *MNDWI*

指数类型	指数名称	TM/ETM的计算公式	OLI的计算公式	参考文献
NDBI	归一化差值建筑指数	$NDBI=(\rho_5-\rho_4)/(\rho_5+\rho_4)$	$NDBI=(\rho_6-\rho_5)/(\rho_6+\rho_5)$	ZHA等[13], 2003
SAVI	土壤调节植被指数	$SAVI=\frac{\rho_4-\rho_3}{\rho_4+\rho_3+L}(1+L)$	$SAVI=\frac{\rho_5-\rho_4}{\rho_5+\rho_4+L}(1+L)$	HUETE[16], 1988
MNDWI	改进的归一化差值水体指数	$MNDWI=(\rho_2-\rho_5)/(\rho_2+\rho_5)$	$MNDWI=(\rho_3-\rho_6)/(\rho_3+\rho_6)$	XU[15], 2008

注：表中ρ_i为TM/ETM/OLI第i波段的地表反射率，L为土壤调节系数

$$D=\sqrt{X_t^2+Y_t^2} \tag{8}$$

式中：X_t、Y_t分别为t年建成区斑块重心的经纬度坐标；C_{ti}为第t年第i个斑块的面积；X_i、Y_i分别为第t年第i个斑块的几何中心坐标；n为第t年的斑块数；D表示迁移距离。

2.3 地表温度反演

地表温度不仅可以反映城市热环境的时空分布格局，而且对研究城市热岛效应具有深远意义[20]。遥感技术具有覆盖范围广、数据获取成本低、能够快速准确地监测城市地表下垫面温度等优点，已成为开展城市热环境变化趋势及动态评价研究的主要技术手段[3]。目前，利用热红外遥感数据反演地表温度的常用方法有基于影像的反演算法[20]、辐射传输方程法[21]、JIMÉNZ-MUÑOZ J C单通道算法[22]、覃志豪单窗算法[23]。本文采用基于影像的反演算法和辐射传输方程法分别对Landsat 5和Landsat 8的热红外波段进行反演。热红外波段数据经辐射定标后，可根据Planck辐射函数计算得到地表亮度温度。首先，经热红外波段数据经辐射定标后，根据Planck辐射函数计算得到地表亮度温度；然后，根据文献[24]中的算法利用Landsat 5 TM6波段反演地表温度；Landsat 8则基于波段10利用辐射传输方程反演地表温度[25]，主要反演参数如下：透射率τ_{10}为0.91，大气向上、向下辐射亮度分别为0.68 W·m^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1}和1.19 W·m^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1}，地表比辐射率采用NDVI阈值法获取[26,20]，其计算公式为：

$$L_\lambda = gain \times DN + bais \tag{9}$$

$$T_b = K_2/\ln(K_1/L_\lambda + 1) \tag{10}$$

$$T_s = T_b/[1+(\lambda_6 T_b/\alpha)\ln\varepsilon_6] \tag{11}$$

$$T_s = C_1/\lambda_{10} \ln\left(\frac{C_2}{\lambda_{10}^5(L_{10}-I_{10}^{\uparrow}-\tau_{10}((1-\varepsilon_{10})I_{10}^{\downarrow})/\tau_{10}\varepsilon_{10})}+1\right) \tag{12}$$

式中：L_λ为热红外波段辐射亮度值；T_b为地表亮度温度；DN为影像灰度值；$gain$和$bias$为热红外波段的增益与偏置；K_1和K_2为定标参数，对TM6波段取值分别为607.76 Wm·$^{-2}$sr^{-1}·μm^{-1}和1 260.56 K；对TIRS10波段，取值分别为774.89 Wm·$^{-2}$sr·$^{-1}$μm^{-1}和1 321.08 K；T_s为地表温度，中心波长λ_6取11.475 μm，α取1.438×10^{-2} mK；C_1，C_2为常数，分别取值为14 387.7 μm·K和1.191 04×10^8 W·μm^4·m^{-2}·sr^{-1}，λ_{10}取10.9 μm，ε_6和ε_{10}分别为基于TM6和TIRS10波段的地表比辐射率，τ_{10}为大气在TIRS10波段的透过率，$I_{10}^{\uparrow}$和$I_{10}^{\downarrow}$分别为大气向上辐射亮度和大气向下辐射亮度。

2.4 热岛比例指数

同一地区不同时期所获取的太阳辐射能量不同，不能直接对绝对温度值进行比较。为了有效地减小不同时期地表温度的差异，本文采用徐涵秋[27]提出的温度正规化方法和城市热岛比例指数定量研究4个时期研究区城市热环境变化。该指数已被国家环境保护部和住房城乡建设部引用，并广泛应用与城市热环境变化的研究中[9]，其计算公式分别为：

$$T^* = (T_i - T_{min})/(T_{max} - T_{min}) \tag{13}$$

式中：T^*表示第i个像元正规化后的值；T_i为第i个像元的温度值；T_{min}为地表温度的最小值；T_{max}为地表温度的最大值。

$$URI = \frac{1}{100m}\sum_{i=1}^{n} w_i p_i \tag{14}$$

式中：URI为城市热岛比例指数；m为正规化等级指数；n为城区高于郊区的温度等级数；w为权重值，取第i级的级值；p为第i级的百分比。

3 结果与分析

3.1 城市扩展

利用公式(1)计算研究区4个年份的IBI指数，经多次试验确定阈值分别为0.828 4、0.980 4、0.801 1以及0.943 2时提取的城市建成区范围较为合理，获得1989—2017年间银川市城市扩展时空变化图(图2)，采用公式(2)~(8)计算研究区4个年份的城市形态演化指标(表2)。结果表明，1989—1999年，建成区扩展面积较小，扩展速度仅为3.29 km^2·a^{-1}；1999—2010年，银川市建成区快速扩展，面积迅速增加，扩展面积达323.62 km^2，扩展速度和强度约为前一时期的8.9倍和6.8倍；2010—2017年，建成区持续扩展，面积继续增加，扩展面积、速度和强度相对于1999—2010年有所减小，扩展趋于稳定。总体来看，28 a间银川市城市快速扩展，建成区面积大幅增加，各时期的扩展速度和强度差异较大且具有阶段性特征，即缓慢扩展(1989—1999年)、快速扩展(1999—2010年)和稳步扩展(2010—2017年)。

从空间分布上看，1989年建成区主要分布在西

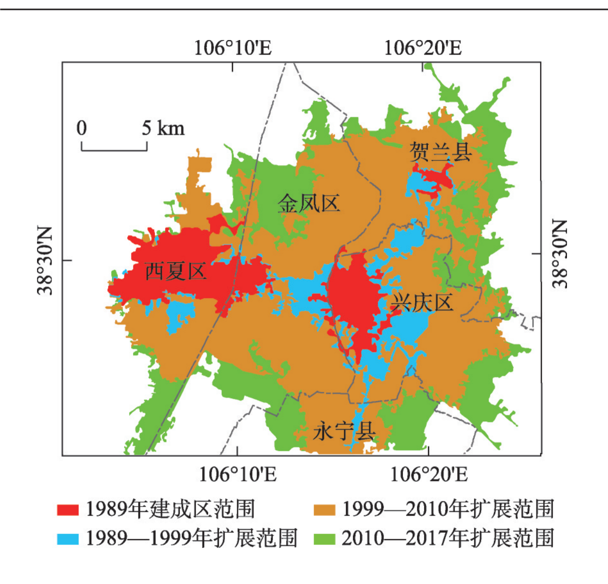


图2 银川市城市建成区扩展时空变化图

Fig. 2 Spatial and temporal change of urban built-up area expansion of Yinchuan City in 1989-2017

夏区、兴庆区和贺兰县，建成区之间彼此相互独立；1989—1999年，城市不断扩展，金凤区逐步开发，与西夏区和兴庆区连接贯通，且兴庆区建成区已延伸至贺兰县内，初步形成了银川市中心城区的基本格局；1999—2010年，城市迅速扩展，依托北京路形成城市东西向发展主轴，沿民族街、宁安大街和同心街分别构建了兴庆区、金凤区和西夏区南北向城市发展的3条副轴，沿4条发展轴向周边扩展，重点向北发展，与贺兰县和永宁县连接，基本形成了银川市的中心城区；2010—2017年，城市空间进一步拓展，城市发展方向为南进、北拓、东优、西控，城市化建设进程开始逐渐趋于稳定，逐步形成西夏区、金凤区、兴庆区、贺兰县城以及永宁县城区一体化的空间格局。

城市空间形态演变结果显示，银川市建成区紧凑度指数先下降后上升、整体呈上升趋势，分维数总体为下降趋势，表明城市空间形态趋于紧凑化，向着稳定状态发展。1989—1999年城市重心向东北方向迁移约3.18 km，1999—2010年向东北方向迁移约2.04 km，2010—2017年向东南方向迁移约0.6 km，整体上银川市城区28 a间城市重心向东北方向迁移约5.54 km(图3)。

综上所述，28 a来银川市城市发展迅速，建成区扩展剧烈，各时期扩展速度和强度有较大差异，扩展方向各时期也不尽相同，整体向东部和北部扩展。研究区目前正处于快速城市化进程中，随着“一带一路”和“银川都市圈”政策的提出和实施，城市建成区的空间范围将进一步扩展，将对银川市城市发展空间布局和热环境改善与治理提出更多挑战。

3.2 热环境时空变化

根据公式(9)~(12)反演得到研究区4个时期的地表温度，在利用MODIS地表温度产品进行地表温度反演精度检验时，首先将其重采样至空间分辨率为30 m，然后与Landsat数据进行配准，最后随机生成点间距为1 000 m的198个点，分别提取2010年和2017年的MODIS地表温度产品数据和Landsat反演得到的地表温度反演数据并进行相关性分析，结果显示2个年份的相关系数分别为0.71和0.73，较好地满足了研究需求。

利用公式(13)将反演得到的4个时期的地表温度正规化，使其分布范围统一到0～1之间，采用自然间断点法将正规化后的地表温度影像分为特高温、高温、较高温、中温、次中温、较低温和低温7个等级(图4)，根据公式(14)计算4个时期的城市热岛比例指数(表3)，本研究中热岛由特高温、高温和较高温3个等级构成，取m=7，n=3。结果显示，1989—1999年，热岛范围有所扩大，其中高温区域面积增加最多，约35.99 km^2，热岛强度增强；1999—2010

表2 银川市不同年份建成区面积及其形态指标

Fig. 2 Urban built-up area and related shape indicators of Yinchuan City in 1989—2017

年份 /a	面积 /km^2	扩展面积 /km^2	扩展速度 /km^2·a^{-1}	扩展强度 /%	紧凑度指数	分维数	重心坐标X /m	重心坐标Y /m	迁移距离 /km
1989	74.01	–	–	–	0.20	1.69	603 594.81	4 260 401.68	–
1999	106.91	–	–	–	0.14	1.79	606 667.40	4 261 207.74	–
2010	430.53	–	–	–	0.19	1.51	608 684.02	4 261 527.63	–
2017	580.14	–	–	–	0.30	1.34	609 092.37	4 261 094.74	–
1989—1999	–	32.90	3.29	44.45	–	–	–	–	3.18
1999—2010	–	323.62	29.42	302.70	–	–	–	–	2.04
2010—2017	–	149.61	21.37	34.75	–	–	–	–	0.60

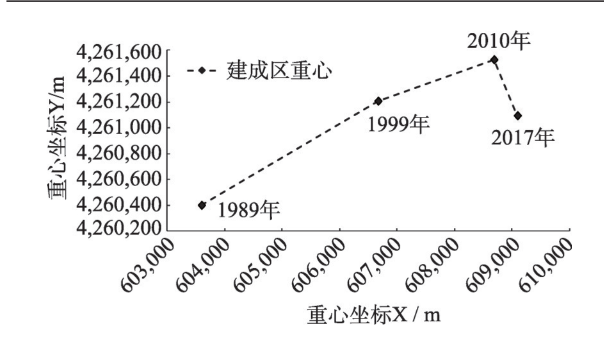


图3 银川市城市建成区重心时空变化图

Fig. 3 Spatial and temporal change of urban built-up centriod of Yinchuan in 1989-2017

年，热岛面积快速增加，增加面积达142.65 km^2，其中较高温、高温和特高温分别占热岛增加面积的49.03%、24.12%和26.85%，较高温区域面积增加最多，热岛强度持续增强，但强度已向较高温转移；2010—2017年，热岛增加面积较前一时期有所减小，共增加约77.22 km^2，其中较高温和高温区域面积分别增加58.55 km^{2}和28.6 km^2，而特高温区面积减小约9.93 km^2，热岛强度继续转向较高温，热岛效应减弱；1989—2017年，研究区热岛范围随着城市扩展不断扩大，主要组成热岛的较高温、高温和特高温区域面积持续增加，面积分别增加了近9倍、10倍和4倍，较高温区域所占热岛比例呈先减小后增加的趋势，高温和特高温占比表现出先增加后减小的特征，热岛强度逐渐向较高温区转移，城市的热岛效应得到缓解。28 a间银川市城市热岛比例指数(*URI*)表现出先上升后下降的特征，整体呈上升趋势，从1989年的0.399上升到2017年的0.422。

3.3 城市扩展与热环境变化的响应关系

城市热环境变化其与下垫面性质关系密切，28 a间银川市城市扩展明显，下垫面变化显著，不透水面面积不断增加，使研究区内的热环境随之发生了很大变化。1989年城市建成区面积较小，热岛主要

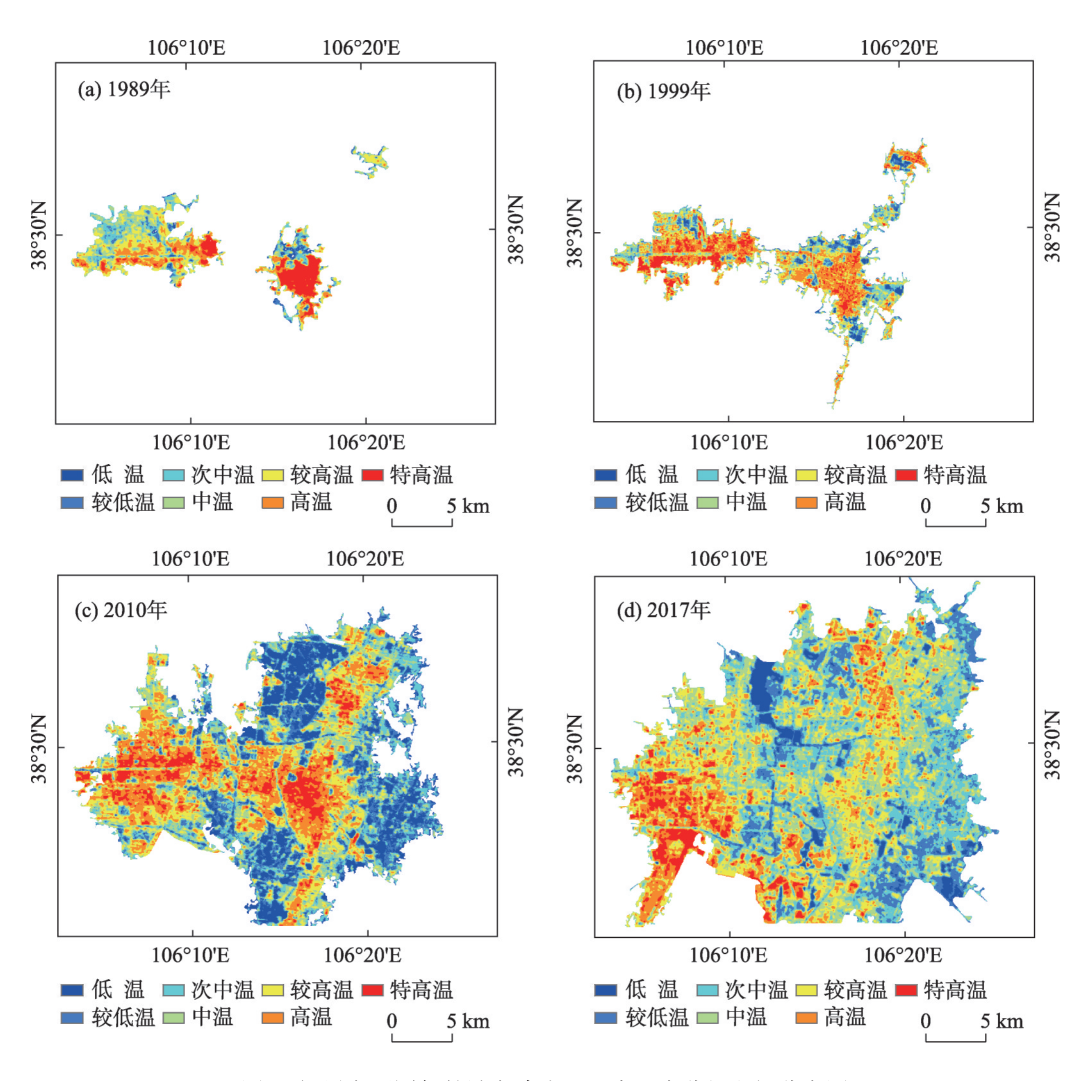


图4 银川市不同年份城市建成区地表温度分级空间分布图

Fig. 4 *LST* levels spatial distribution of urban built-up area of Yinchuan in 1989-2017

表3 银川市建成区不同时期地表温度等级面积及热岛比例指数统计表

Tab. 3 Area of *LST* levels and *URI* of urban built-up of Yinchuan in different periods

等级	面积 / km^2				面积变化 / km^2			
	1989	1999	2010	2017	1989—1999	1999—2010	2010—2017	1989—2017
低温(1)	0.65	0.81	1.23	26.65	0.16	0.42	25.42	26.00
较低温(2)	2.31	2.82	37.98	33.68	0.51	35.16	-4.30	31.37
次中温(3)	8.62	5.83	69.00	78.03	-2.79	63.18	9.03	69.41
中温(4)	26.85	13.20	95.40	137.61	-13.66	82.20	42.21	110.75
较高温(5)	15.72	25.05	94.99	153.54	9.32	69.94	58.55	137.81
高温(6)	10.61	46.61	81.02	109.61	35.99	34.41	28.60	99.00
特高温(7)	9.23	12.59	50.89	40.96	3.36	38.30	-9.93	31.73
URI	0.399	0.659	0.437	0.422	-	-	-	-

集中分布在西夏区东部和兴庆区的老城区；1999年，西夏区和兴庆区的建成区整体向西扩展，高温区域面积增加最多，热岛效应增强；2010年，城市持续扩展，热岛范围也随之不断扩大，热岛效应持续增强，但强度已向较高温转移，且西夏区北京路两侧、金凤区开发区、兴庆区老城区以及贺兰县城南部区域热岛效应显著；2017年，城市范围进一步扩展，热岛范围也随之蔓延，其中较高温区约占热岛面积的50.49%，远高于高温和特高温区所占比例，热岛强度向较高温转移，热岛效应缓解。兴庆区老城区和金凤区主要为较高温区，高温和特高温区域主要分布在西夏区南部、金凤区南部和贺兰县南部。总体来看，银川市建成区的热岛区域随着城市扩展而不断增大，且在空间分布和扩展方向上与城市扩展具有较高的一致性。

3.3.1 *LST*和*IBI*、*SAVI*的关系 为探讨银川市28 a间城市扩展与热环境变化的响应关系，本文分别在4个年份的城市建成区内生成319、943、1 141和1 579个随机点(点间距为200 m)，再将建筑用地指数和土壤调节植被指数进行归一化处理，提取随机点的*LST*、*IBI*和*SAVI*信息，分别采用多种函数(线性、乘幂、指数、对数、多项式等)进行*LST*和*IBI*、*SAVI*之间关系拟合，并最终选取地表温度和2个地表参数的最佳拟合关系(图5)。二元和多元回归结果显示，4个年份的*LST*和*IBI*呈正相关，而*LST*和*SAVI*呈负相关，表明建筑用地对城市地表温度起着促进作用，而植被则起着降温作用，能够缓解城市的热岛效应，建筑用地和植被是城市地表温度的重要影响因素(表4)，只有减少建筑用地面积且增加地表植被覆盖面积，才能有效降低城市地表温度。

3.3.2 不同土地覆盖类型对*LST*的影响 在城市扩展过程中，城区内土地覆盖类型发生改变，进而影响城市热环境变化。为探讨城镇用地、公交建设用地、裸地、草地以及水体等土地覆盖类型对银川市

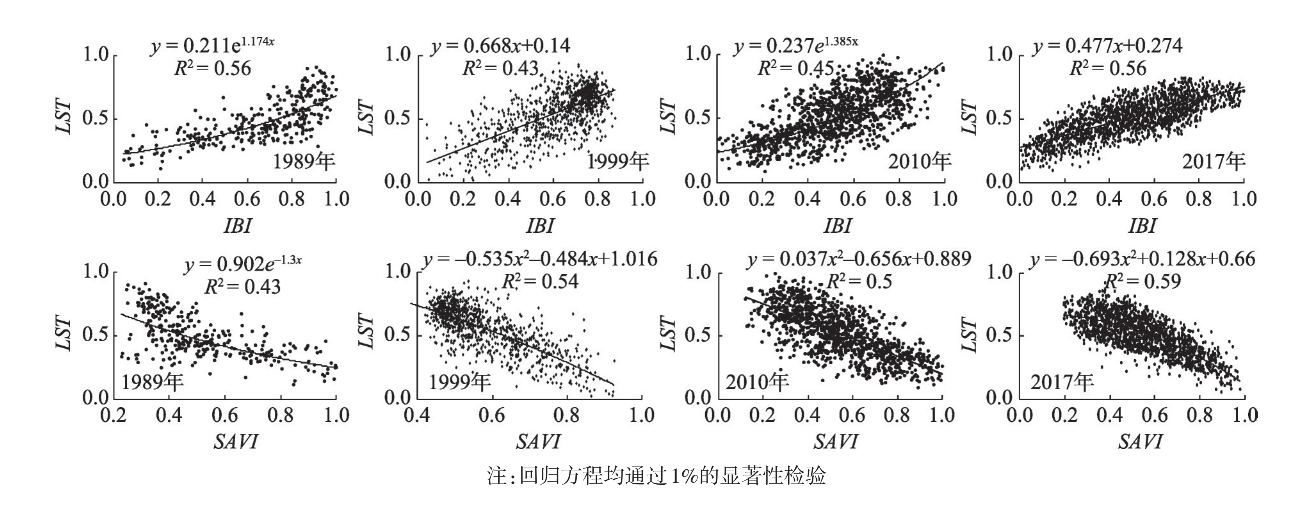


图5 银川市不同年份城市建成区地表温度与建筑用地指数和植被指数关系图

Fig. 5 Relationship between *LST* and *IBI*, *SAVI* of urban built-up area of Yinchuan in 1989-2017

表4 地表温度与建筑用地指数和土壤调节植被指数的回归方程

Fig. 4 Regression equations between *LST* and *IBI*, *SAVI*

年份/年	多因子回归方程	
1989	LST=0.576IBI−0.088$SAVI$+0.063	R^2=0.514
1999	LST=0.381IBI−0.854$SAVI$+0.811	R^2=0.640
2010	LST=0.195IBI−0.519$SAVI$+0.703	R^2=0.517
2017	LST=0.311IBI−0.381$SAVI$+0.564	R^2=0.698

注：回归方程均通过1%的显著性检验

城区热环境的影响，本文基于GF2遥感数据选取了2017年城市建成区内5个区域(图6)，其中a,b,e区域土地覆盖类型为城镇用地和公交建设用地(主要为居民地和工业园区)，c区域覆盖典农河两岸，土地覆盖类型有城镇用地、草地和水体，d区域为城镇用地和裸地。分别对5个区域的地表温度进行统计分析，结果显示a,b,d,e区域的平均地表温度显著高于研究区的平均地表温度33.37 ℃；而c区域的平均地表温度为33.44 ℃，接近研究区的平均地表温度(表5)。由此可见，城镇用地、公交建设用地和裸地能促进地表温度升高，而草地和水体能够降低地表温度。银川都市圈城市地质调查项目调查结果显示，截止2017年底银川市城区约有小区1 105个(不包括老旧小区)，工业园区23个，大型百货商场38个，以上地表覆盖类型能够有效提高建筑物所在地及其周边的地表温度。

公园绿地及水体能有效缓解城市热岛效应，在改善城市热环境问题的过程中具有明显作用[28]。为定量研究银川市公园绿地和水体对城市地表温度的缓解程度，本研究对研究区内57个公园绿地154个水体进行缓冲半径分别为100 m、200 m、300 m、400 m和500 m的缓冲分析，并统计不同缓冲区内的地表温度(表5)，结果显示公园绿地5个缓冲区内的平均地表温度和水体5个缓冲区内的平均地表温度均低于研究区的平均地表温度，且随缓冲半径的增加平均地表温度呈上升趋势，表明公园绿地能有效缓解银川市城市热岛效应。此外，对比公园绿地和水体在相同缓冲半径的地表温度可知，前者的地表温度均高于后者，表明水体对降低城市地表温度的效果要好于公园绿地。

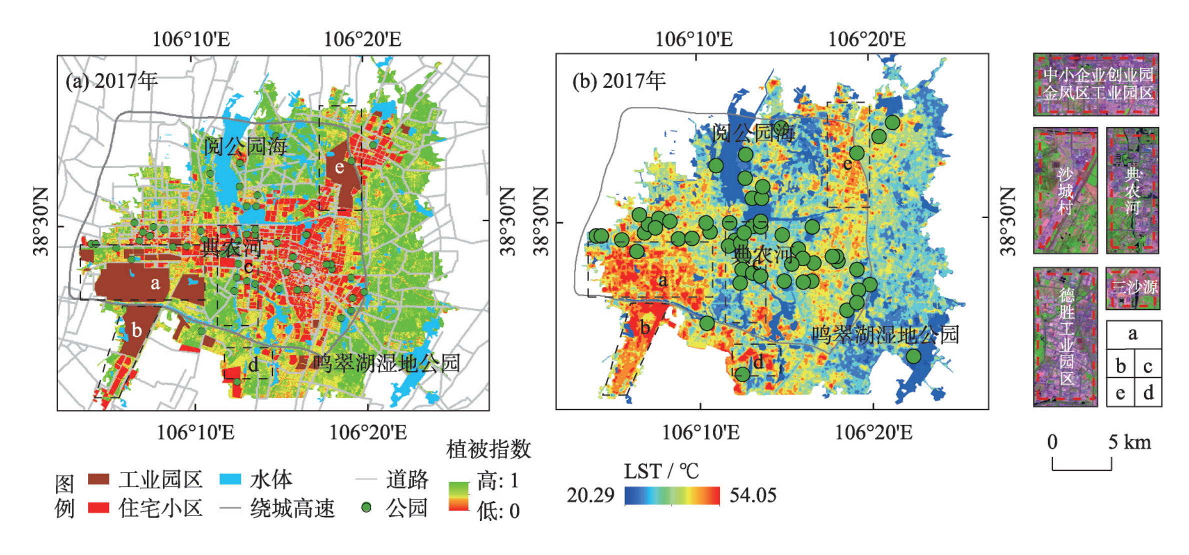


图6 银川市2017年城市建成区不同下垫面类型与地表温度关系图

Fig. 6 Relationship between *LST* and different underlying surface type of urban built-up area of Yinchuan in 2017

表5 银川市2017年城市建成区不同土地覆盖类型地表温度统计表

Fig. 5 *LST* statistics of different land cover of urban built-up area of Yinchuan in 2017

区域	均值 / ℃	土地覆盖类型	植被覆盖度	公园缓冲半径 / m	均值 / ℃	土地覆盖类型	植被覆盖度	水体缓冲半径 / m	均值 / ℃	土地覆盖类型
a	37.85	城镇、公交建设用地	低	100	31.26	草地	高	100	30.83	水体
b	38.37	城镇、公交建设用地	低	200	31.90	草地	高	200	31.68	水体
c	33.44	城镇、草地、水体	中	300	32.38	草地	高	300	32.18	水体
d	37.44	城镇、裸地	低	400	32.82	草地	高	400	32.51	水体
e	36.57	城镇、公交建设用地	低	500	33.16	草地	高	500	32.75	水体

3.3.3 城市热环境变化原因分析 28 a间，研究区经济快速发展，人口增长迅速，从而加速了房地产开发进程，使银川市城市建成区快速扩展，导致地表下垫面结构改变，从而促使城市热环境发生变化。银川市建成区热岛效应的缓解与城市合理规划、增加城市绿地面积关系密切，根据银川市城市总体规划（2011—2020年），城市中心城区布局突出生态优先的发展模式，逐步构建形成了“四轴三带多中心”的城市布局形态，城市功能得到了进一步优化，有效地改善了城市生态环境和人居环境。近年来银川市大力实施生态优先战略，构建“西护山，东治沙，中造景”的大绿化格局，城市绿地面积以每年近5 km^2的速度递增，截至2017年底，银川市已有公园和小微公园114个，城市建成区绿化覆盖面积达到70.86 km^2，公园绿地面积23.19 km^2，城市绿地率、城市人均公园绿地面积预计分别达到40.99%和16.79 km^2·人$^{-1}$；此外，银川市城区内河流湖泊湿地面积约56.21 km^2，面积较大的有鸣翠湖、阅海湖、宝湖、七十二连湖等，上述措施对缓解银川市热岛效应起到了积极的作用。

4 结 论

研究基于多源遥感数据，提取了1989、1999、2010年和2017年4个时期银川市城市建成区的范围并对地表温度进行了反演，深入分析了28 a间城市建成区扩展及热环境变化的时空演变特征，定量研究了城市扩展与热环境变化、热岛与下垫面的关系，主要结论如下：

（1）1989—2017年银川市城市建成区扩展面积达506.13 km^2，各时期的扩展速度和扩展强度差异较大且表现出阶段性特征，即缓慢扩展（1989—1999年）、快速扩展（1999—2010年）和稳步扩展（2010—2017年）；建成区紧凑度指数先下降后上升、整体呈上升趋势，分维数总体为下降趋势，城市空间形态趋于紧凑化，向着稳定状态发展；城市整体向东部和北部扩展，重心整体向东北方向迁移约5.54 km；

（2）研究区热岛范围随着城市扩展不断扩大，较高温、高温和特高温区面积分别增加了近9倍、10倍和4倍，较高温区域所占热岛比例呈先减小后增加的趋势，高温和特高温占比表现出先增加后减小的特征，热岛强度逐渐向较高温区转移，城市的热岛效应得到缓解；热岛空间分布显示，热岛逐渐由兴庆区老城区蔓延至贺兰县和西夏区，且兴庆区热岛逐渐演化为相互独立的小次级热岛，强度有所降低；28 a间银川市城市热岛比例指数（*URI*）表现出先上升后下降的特征，整体呈上升趋势；

（3）热岛区域在空间分布和扩展方向上与城市扩展具有较高的一致性。*LST*和*IBI*、*SAVI*回归结果显示，4个年份的*LST*和*IBI*呈正相关，*LST*与*SAVI*呈负相关关系。城镇用地、公交建设用地和裸地能促进地表温度升高，而草地和水体能够降低地表温度，公园绿地和水体能有效缓解城市热岛效应且水体对降低城市地表温度的效果要好于公园绿地。

参考文献(References)

[1] Department of Economic and Social Affairs (UN DESA), United Nations. World urbanization prospects: The 2014 revision highlights[R]. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs: 2014, 20.

[2] 鲍超, 邹建军. 中国西北地区城镇化质量的时空变化分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1141-1152. [BAO Chao, ZOU Jianjun. Spatiotemporal variations of urbanization quality in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1141-1152.]

[3] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1134-1147. [YAO Yuan, CHEN Xi, QIAN Jing. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1134-1147.]

[4] 李瑶, 潘竟虎. 基于Landsat 8劈窗算法与混合光谱分解的城市热岛空间格局分析——以兰州市中心城区为例[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 111-119. [LI Yao, PAN Jinghu. Spatial pattern on urban heat environment using split window algorithm and spectral mixture analysis based on Landsat 8 images: A case of Lanzhou City[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 111-119.]

[5] 祝新明, 王旭红, 周永芳, 等. 建成区扩张下的西安市热环境空间分异性[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3574-3583. [ZHU Xinming, WANG Xuhong, ZHOU Yongfang et al. Spatial variability of thermal environment in Xi'an under the build-up area expansion [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,3 6(12): 3574-3583.]

[6] MADANIAN M, SOFFIANIAN A R, KOUPAI S S, et al. Analyzing the effects of urban expansion on land surface temperature patterns by landscape metrics: A case study of Isfahan City, Iran[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2018, 190(4): 189.

[7] BOYAN L, WEI W, LIANG B, et al. Effects of spatio-temporal landscape patterns on land surface temperature: A case study of Xi'an City, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(7): 419.

[8] 李乐, 徐涵秋. 杭州市城市空间扩展及其热环境变化[J]. 遥感技

术与应用, 2014, 29(2): 264−272. [LI Le, XU Hanqiu. Urban expansion and thermal environment changes in Hangzhou City of east of China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 264−272.]

[9] 庄元, 薛东前, 王剑. 半干旱区典型工业城市热岛时空分布及演变特征——以包头市为例[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 276−283. [ZHUANG Yuan, XUE Dongqian, WANG Jian. Spatial-temporal evolution of urban heat island in semiarid typical industrial city: A case of Baotou City[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 276−283.]

[10] 吕荣芳, 王浩, 王鹏龙, 等. 近25 a银川市城市化进程中热力景观格局演变分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 860−868. [LV Rongfang, WANG Hao, WANG Penglong, et al. Evolution of thermal landscape pattern in urbanization of Yinchuan City in recent 25 years[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 860−868.]

[11] 孙鹏, 韩沐汶, 白林波, 等. 基于Landsat TM/ETM的银川市热岛效应时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 290−293. [SUN Peng, HAN Muwen, BAI Linbo, et al. Study on spatiotemporal variation of heat island effect based on Landsat TM/ETM in Yinchuan City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 290−293.]

[12] 杨存建, 周成虎. TM影像的居民地信息提取方法研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 146−150. [YANG Cunjian, ZHOU Chenghu. Extracting residential areas on the TM imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(2): 146−150.]

[13] ZHA Y, GAO J, NI S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(3): 583−594.

[14] XU Hanqiu. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 4269−4276.

[15] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(*MNDWI*)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589−595. [XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (*MNDWI*)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589−595.]

[16] HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (*SAVI*)[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295−309.

[17] 杨立国, 周国华. 怀化城市形态演变特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2010, 29(5): 627−632. [YANG Liguo, ZHOU Guohua. Evolution characteristics of the urban morphology and its forming mechanism in Huaihua[J]. Progress in Geography, 2010, 29(5): 627−632.]

[18] 潘竟虎, 韩文超. 兰州中心城区用地扩展及其热岛响应的遥感分析[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2597−2603. [PAN Jinghu, HAN Wenchao. Urban expansion and its heat island response in Lanzhou City based on remote sensing analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2597−2603.]

[19] BATTY M. Exploring isovist fields: space and shape in architectural and urban morphology[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001, 28(1): 123−150.

[20] SOBRINO J A, JIMÉNEZ−MUÑOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434−440.

[21] ARTIS D A, CARNAHAN W H. Survey of emissivity variability in thermograph of urban areas [J]. Remote Sensing of Environment, 1982, 12(4): 313−329.

[22] JIMÉNEZ−MUÑOZ J C, SOBRINO J A. A generalized single channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D22): 1−9.

[23] QIN Z H, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719−3746.

[24] NICHOL J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71 (6): 613−621.

[25] BARSI J A, SCHOTT J R, HOOK S J, et al. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration[J]. Remote Sensing, 2014, 6(11): 11607−11626.

[26] YU X, GUO X, WU Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS: Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method [J]. Remote Sensing,2014, 6(10): 9829−9852.

[27] 徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J]. 遥感技术与应用, 2003, (3): 129−133. [XU Hanqiu, CHEN Benqing. An image processing technique for the study of urban heat island changes using different seasonal remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, (3): 129−133.]

[28] 栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 等. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究—以北京为例[J]. 生态环境学报, 2014, (2): 252−261. [LUAN Qingzu, YE Caihua, LIU Yonghong, et al. Effect of urban green land on thermal environment of surroundings based on remote sensing: A case study of Beijing, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, (2): 252−261.]

Urban built-up area expansion and thermal environment variation in Yinchuan City based on remote sensing

ZHANG Xiao-dong[1,2], ZHAO Yin-xin[1], WU Dan[3], CHU Xiao-dong[1], WU Wen-zhong[1], ZHANG Yong[1], LIU Nai-jing[1], LI Yan[4]

(1 *Ningxia Geological Survey Institute, Yinchuan* 750021, *Ningxia , China;* 2 *School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China;* 3 *Ningxia Institute of Remote Sensing Survey & Mapping* 750021, *Yinchuan* 750021, *Ningxia ,China;* 4 *Architecture Design and Research Institute Co., Ltd.of Yinchuan in Ningxia,Yinchuan* 750021, *China*)

Abstract: Since its establishment as the capital of the Ningxia Hui Autonomous Region, the city of Yinchuan has been facing an increasingly serious urban-heat-island effect due to rapid urbanization. To provide insight into the city's changes, thermal environment variation, and the response relationship of urban built-up area expansion and the thermal environment in Yinchuan during the past 28 years, this study used Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI image data for 1989, 1999, 2010, and 2017 to extract urban built-up area using the index-based built-up index, and the expansion intensity, speed, compactness index, fractal dimension, and center of gravity from urban morphology evolution indices such as AGR, AGA, BCI for the same period. The study also used land surface temperature (LST) values retrieved through the thermal infrared bands based on a radiative transfer equation, and calculated the urban-heat-island ratio index (URI) for these four years through normalized LST. Lastly, the space-time evolution of urban built-up area expansion and thermal environment variation were studied and their response relationship was discussed. The results showed the following: (1) During 1989-2017, urban built-up area expanded rapidly, increasing by nearly 506.13 km^2. The expansion intensity and speed of different periods varied greatly; however, they presented periodical characteristics with slow-rapid-steady expansion phases. The compactness index showed an upward trend while the fractal dimension showed a downward trend overall, which demonstrated that the urban spatial form tended to be compact and stable. The city expanded to the east and north and the city's center of gravity shifted nearly 5.54 km to the northeast. (2) The heat island area gradually increased with urban expansion, with areas of higher temperature, high temperature, and extremely high temperature increasing by factors of approximately 9, 10, and 4 over the past 28 years, respectively. However, the heat intensity transferred from the region of high temperature and extremely high temperature to the higher temperature region, thus relieving the heat island effect. The heat island's spatial distribution showed that it spread from the old town area of Xingqing district to Helan County and Xixia district. Meanwhile, the Xingqing district heat island gradually evolved into an independent small secondary island, alleviating the intense overall heat island effect of Yinchuan, and URI showed an increasing trend first and then a decreasing trend but an overall increase. (3) The spatial distribution and expansion direction of the high temperature region of the LST is highly consistent with urban expansion. In addition, urban land, buildings, and bare land could increase LST, whereas grass land and water could decrease it, meaning that urban green spaces and water were able to effectively alleviate the heat island effect, with water demonstrating greater LST decreases than urban green spaces.

Keywords: urban build-up area expansion; thermal environment variation; Land Surface Temperature (LST); remote sensing; Yinchuan City